



O uso de inibidores de corrosão orgânicos em estruturas de concreto armado

The use of organic corrosion inhibitors in reinforced concrete structures

Victor Gustavo Chiari(1); Matheus Rocha da Silva (2)

(1) Mestre em Engenharia Civil, Corr Brasil / C4V Consultoria, Gestão e Soluções para Engenharia

(2) Engenheiro Civil, Corr Brasil

Endereço para correspondência: Blumenau (SC)

Resumo

Devido às interações com o ambiente no qual estão expostas, as estruturas de concreto sofrem alterações que podem, com o passar do tempo, comprometer sua estabilidade. A deterioração do concreto pode ocorrer devido a causas externas e internas, através de diversos tipos de efeitos e certamente a corrosão é uma das principais causas, portanto, preservar a integridade e prolongar a vida útil das estruturas existentes é de suma importância. A adoção de um concreto de boa qualidade é essencial para que a armadura seja protegida contra a corrosão, porém as estruturas localizadas em ambientes agressivos requerem uma proteção adicional, mesmo que todas as características especificadas sejam atendidas. Neste ínterim, o uso de inibidores de corrosão é uma excelente opção para retardar o processo corrosivo, prolongando a vida útil das estruturas. Este trabalho apresenta e discute a química de inibidores de corrosão orgânicos usados em várias obras no Brasil e no mundo, detalhando seu desempenho em laboratório e aplicações reais em novas obras, reparos localizados e casos de recuperações estruturais.

Palavra-Chave: corrosão, inibidor de corrosão, concreto, estrutura de concreto armado

Abstract

Due to interactions with the environment in which they are exposed, concrete structures undergo changes that, over time, may compromise their stability. Concrete deterioration can occur due to external and internal causes, through various types of effects, with corrosion being undoubtedly one of the main factors. Therefore, preserving the integrity and extending the service life of existing structures is of utmost importance. The adoption of high-quality concrete is essential to protect the reinforcement against corrosion. However, structures located in aggressive environments require additional protection, even when all specified characteristics are met. In this context, the use of corrosion inhibitors is an excellent option to delay the corrosion process, thereby extending the service life of the structures. This study presents and discusses the chemistry of organic corrosion inhibitors used in various projects in Brazil and worldwide, detailing their performance in laboratory tests and real applications, including new constructions, localized repairs, and cases of structural rehabilitation.

Keywords: corrosion, corrosion inhibitors, concrete, reinforced concrete



1 Introdução

O desenvolvimento de traços de alto desempenho tem promovido avanços significativos na qualidade do concreto contemporâneo. No entanto, a ocorrência de fissuras, sejam estas provocadas por retração, recalque ou outras solicitações mecânicas, é uma realidade inevitável, independentemente da excelência do concreto utilizado. Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de inibidores de corrosão capazes de oferecer proteção mesmo na presença de microfissuras.

Além disso, considerando o envelhecimento das infraestruturas, a preservação da integridade estrutural e a extensão da vida útil das construções são fatores de importância crítica. Para tal, tratamentos tópicos com inibidores de corrosão devem apresentar capacidade de penetração até a profundidade das armaduras embutidas no concreto.

Os inibidores migratórios de corrosão (do inglês, *Migrating Corrosion Inhibitors* - MCI) constituem uma solução técnica e economicamente viável para atender a essas demandas. Estão disponíveis em diversas formas para diferentes aplicações na construção civil: aditivos para concretos novos, argamassas e grautes de reparo, tratamentos superficiais, produtos injetáveis e formatos especiais para aplicações específicas.

Os MCI são considerados inibidores de corrosão orgânicos (do inglês, *Organic Corrosion Inhibitors* - MCI) e são compostos à base de aminas que apresentam significativa pressão de vapor saturado em condições atmosféricas, o que permite o transporte da substância inibidora na forma de vapor. O concreto e outros materiais cimentícios possuem uma estrutura porosa que permite a difusão líquida e gasosa dessas substâncias ao longo do substrato. Ao entrarem em contato com as armaduras embutidas, os inibidores orgânicos se adsorvem na superfície metálica, formando uma camada molecular protetora.

Esses compostos constituem um sistema inibidor misto (anódico e catódico). A inibição da reação catódica é promovida pela incorporação de radicais oxidantes à molécula orgânica. As moléculas inibidoras sofrem hidrólise no eletrólito e se adsorvem à superfície metálica. O nitrogênio presente no grupo amina pode formar uma ligação coordenada com o metal (inclusive o aço das armaduras), favorecendo o processo de adsorção. A adsorção de aminas e carboxilatos contribui para o aumento da resistividade da superfície metálica frente à corrosão. Essa camada molecular atua como um tampão, mantendo o pH na interface aço-concreto em um regime básico, superior ao pH 9 (MIKSIC, 2014).

A migração dos inibidores orgânicos de corrosão pelo concreto varia conforme o tipo e método de aplicação. Quando utilizados como aditivos, os inibidores se dispersam uniformemente durante o processo de mistura, podendo migrar até as armaduras tanto na forma líquida quanto gasosa. Nos tratamentos tópicos, a penetração inicial ocorre por sucção capilar na forma líquida, seguida por difusão (BJEGOVIĆ *et al.*, 1994). Estes inibidores são eficazes contra a corrosão induzida por cloretos, bem como frente à carbonatação e à ação de outros agentes agressivos.

Historicamente, a primeira geração dos inibidores orgânicos de corrosão baseava-se em álcoois aminados. A geração mais recente, introduzida no início da década de 1990, é



composta por carboxilatos de amina, desenvolvidos a partir de subprodutos do milho, um recurso renovável.

O presente artigo apresenta uma abordagem geral sobre o uso de inibidores de corrosão em estruturas de concreto armado, reunindo fundamentos técnicos e os principais mecanismos de atuação desses compostos. São discutidos, em especial, os sistemas migratórios aplicados tanto em concretos novos quanto em intervenções de reparo e reforço, além dos princípios físico-químicos que regem a adsorção dos compostos orgânicos nas armaduras e os ensaios não destrutivos utilizados para identificar sua presença no interior do concreto.

No Brasil, o tema já é amplamente estudado há décadas, com diversas pesquisas acadêmicas e aplicações práticas que consolidam o país como uma referência no uso de inibidores de corrosão. Vários grupos de pesquisa nacionais têm contribuído de forma significativa para a compreensão de sua eficácia em diferentes condições de exposição, tornando o assunto parte do repertório técnico de engenheiros e pesquisadores.

Apesar dos avanços alcançados, a evolução das tecnologias e o surgimento de novas formulações reforçam a necessidade de estudos cada vez mais aprofundados, que avaliem não apenas o desempenho isolado dos inibidores, mas também sua compatibilidade com outros aditivos e sistemas de proteção. Esta análise busca, portanto, ampliar o entendimento técnico e difundir o uso de soluções mais sustentáveis e eficazes para a prevenção da corrosão em estruturas de concreto armado.

2 A químicos dos inibidores orgânicos de corrosão

A classificação dos inibidores de corrosão está diretamente relacionada à parte da célula eletroquímica onde atuam. No caso dos inibidores orgânicos, estes são considerados inibidores mistos, pois interferem tanto nas reações anódicas quanto nas catódicas do processo de corrosão (MEYER, 2017). Sua ação consiste na formação de uma película molecular protetora sobre a superfície do aço, a partir do processo de adsorção do inibidor ao metal.

Essa película atua como uma barreira física, impedindo que agentes agressivos, como íons cloreto, dióxido de carbono e outros contaminantes entrem em contato com as armaduras embutidas no concreto. Além disso, contribui para a redução da taxa de corrosão já instalada.

O processo de adsorção ocorre por meio do grupo funcional polar da molécula, que se ancora à superfície metálica. Simultaneamente, a cadeia apolar (ou hidrofóbica) da molécula se orienta perpendicularmente ao metal. Essas cadeias hidrofóbicas possuem a capacidade de repelir soluções aquosas agressivas e, ao interagirem entre si, formam agregados que resultam em uma película densa, coesa e contínua, promovendo uma proteção eficaz da superfície metálica (MIKSIC, 2014).

Os inibidores atingem as armaduras embutidas por meio de diferentes mecanismos físicos e químicos. Inicialmente, ele é uniformemente disperso na matriz do concreto durante o processo de mistura, garantindo uma distribuição adequada do aditivo. Em seguida, sua migração ocorre por infiltração líquida através da rede de poros capilares do concreto

endurecido. Essa rede capilar funciona como um canal natural que permite a condução de fluidos contendo os compostos inibidores ao longo do material cimentício.

Outro mecanismo relevante está associado à pressão de vapor relativamente alta apresentada pelos inibidores, o que possibilita sua difusão no estado gasoso. Essa difusão se dá tanto pela matriz porosa do concreto quanto por microfissuras existentes, mesmo na ausência de umidade livre. Tal característica permite que os compostos atinjam regiões críticas da armadura, mesmo em zonas de difícil acesso.

Por fim, ao entrarem em contato com os metais embutidos, as moléculas inibidoras apresentam afinidade específica pela superfície metálica, promovendo sua adsorção e a consequente formação da película protetora, conforme descrito anteriormente.

Este processo de migração e adsorção dos inibidores orgânicos é representado esquematicamente nas Figura 1, Figura 2 e Figura 3, as quais ilustram os principais caminhos de transporte e os mecanismos de ação dos inibidores no interior do concreto armado.

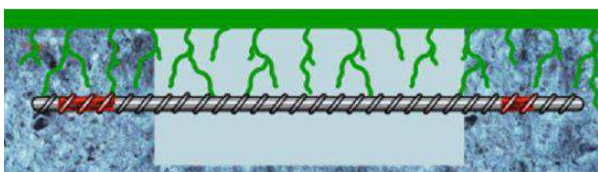


Figura 1. Infiltração do inibidor em fase líquida através da rede capilar do concreto.
Fonte: MIKSIC, 2014

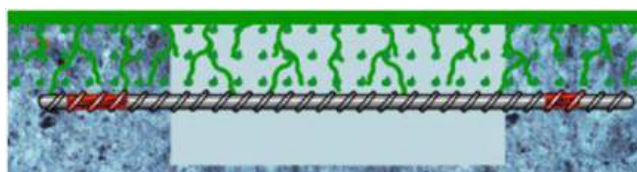


Figura 2. Difusão na fase de vapor através dos poros do concreto e de fissuras superficiais.
Fonte: MIKSIC, 2014

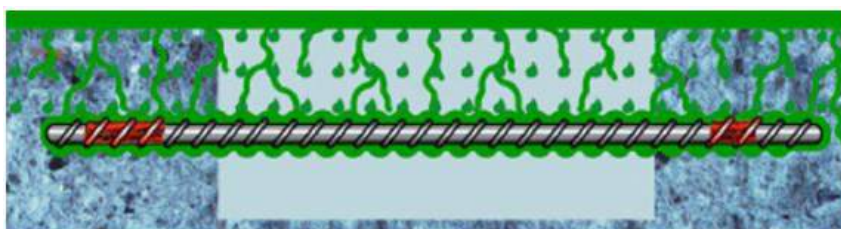


Figura 3. Mecanismo de migração do inibidor de corrosão. Após a difusão nas fases líquida e vapor, com adsorção final no metal para formação de película protetora.
Fonte: MIKSIC, 2014

A movimentação das moléculas do material no interior do concreto segue o princípio da difusão de Fick, mais especificamente a Segunda Lei de Fick, que descreve o transporte de massa em meios porosos. De acordo com essa lei, as moléculas tendem a se deslocar aleatoriamente de regiões com alta concentração para regiões com baixa concentração, até que se atinja o equilíbrio dinâmico de distribuição.

No contexto das estruturas de concreto armado, a armadura embutida representa o ponto de menor concentração de inibidor livre, uma vez que ocorre a adsorção permanente das moléculas sobre sua superfície. Esse fenômeno mantém o gradiente de concentração ativo e direciona o fluxo dos inibidores em direção ao metal, garantindo a contínua migração dos compostos protetores até que a superfície da armadura esteja suficientemente coberta por uma película adsorvida.



Esse mecanismo é fundamental para o funcionamento eficaz dos inibidores migratórios, pois possibilita proteção mesmo em zonas profundas e de difícil acesso, sem a necessidade de remoção do concreto de recobrimento.

2.1 Compatibilidade e possíveis interferências com outros materiais

A aplicação dos MCI em concretos estruturais requer atenção especial à compatibilidade com outros aditivos, pois a interação entre compostos pode modificar propriedades no estado fresco e endurecido. ACI 212.3R (2016) recomenda avaliar efeitos em parâmetros como tempo de pega, teor de ar incorporado e resistências mecânicas, uma vez que a presença dos MCI pode reduzir a eficácia de agentes incorporadores de ar e alterar a dispersão promovida por superplastificantes (OLEK et al., 2012). Tais interferências, quando não controladas, podem comprometer a durabilidade do concreto, sobretudo em ambientes sujeitos a ciclos de gelo e degelo (TIAN et al., 2023).

No caso de aceleradores, como o nitrito de cálcio, a combinação com MCI é tecnicamente viável, mas pode modificar a cinética de hidratação, exigindo ajustes de dosagem para não prejudicar a trabalhabilidade e o calor de hidratação (ACI 212.3R-10, 2010). De modo análogo, retardadores e aditivos redutores de retração podem potencializar o atraso no tempo de pega, reforçando a necessidade de ensaios prévios para validação da formulação. Ensaios normalizados, como ASTM C1582 (2017) e ASTM G180 (2004), são frequentemente utilizados para verificar tais interações em condições laboratoriais (MEYER, 2017).

A presença de adições minerais, como sílica ativa, escória de alto-forno e cinzas volantes, tende a melhorar a eficácia dos inibidores ao reduzir a permeabilidade da matriz cimentícia, dificultando a penetração de agentes agressivos. No entanto, em sistemas de aplicação superficial, a redução de porosidade pode limitar a difusão dos compostos até as armaduras, o que exige comprovação experimental da penetração por técnicas de fluorescência ou espectroscopia (MIKSIC, 2014). Essa ambivalência reforça a importância de avaliar não apenas o desempenho químico do inibidor, mas também a interação com as características microestruturais do concreto.

Por outro lado, pesquisas recentes relatam efeito sinérgico da associação entre inibidores migratórios e hidrofugantes à base de silanos ou siloxanos, em que a barreira física contra a entrada de água e cloretos se soma à proteção eletroquímica conferida pelo filme orgânico adsorvido na armadura (HUANG et al., 2020). Esse resultado indica que, embora os inibidores orgânicos não apresentem compatibilidade universal, combinações bem planejadas podem potencializar o desempenho global. Assim, a avaliação de compatibilidade deve ser conduzida caso a caso, com base em ensaios experimentais que assegurem tanto o equilíbrio das propriedades no estado fresco quanto a durabilidade estrutural a longo prazo.

2.2 Comparação entre álcoois aminados e carboxilatos de amina

A principal diferença entre os álcoois aminados (*amine alcohols*) e os carboxilatos de amina (*amine carboxylates*) está relacionada à extremidade de suas cadeias moleculares. Os álcoois aminados apresentam um grupo terminal hidroxila ($-OH$), enquanto os carboxilatos de amina não possuem esse grupo hidrofílico exposto.



A presença do grupo –OH nos álcoois aminados os torna mais propensos à interação com o eletrólito aquoso presente na região adjacente à armadura. Essa característica pode favorecer a dessorção da película protetora da superfície metálica, permitindo o acesso de agentes agressivos, como os íons cloreto, ao aço, por exemplo. Por outro lado, os carboxilatos de amina formam uma ligação mais forte e estável com a superfície metálica, conferindo maior resistência à remoção da camada protetora adsorvida (MIKSIC, 2014).

A força de adsorção entre a molécula do inibidor e a superfície da armadura é um fator determinante para o desempenho da solução, tanto no retardo do início da corrosão quanto na redução das taxas de corrosão após sua ativação. Estudos experimentais indicam que os álcoois aminados proporcionam uma leve extensão do tempo até o início da corrosão, e, uma vez iniciada, as correntes de corrosão são reduzidas pela metade em relação ao concreto de referência. Já os carboxilatos de amina demonstram desempenho superior: duplicam ou triplicam o tempo até o início da corrosão, e, após a ativação do processo corrosivo, conseguem reduzir as taxas de corrosão em 5 a 15 vezes em comparação ao controle (SUESS & STEHLY, 2002).

Além disso, os carboxilatos de amina apresentam um efeito adicional benéfico durante sua migração pelo concreto onde parte de suas moléculas reagem com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), presente na matriz cimentícia, formando carboxilato de cálcio, $\text{Ca}(\text{COO})_2$, um sal insolúvel. Esse composto tende a se depositar nos poros capilares, reduzindo a permeabilidade e dificultando a penetração futura de cloretos e outros agentes agressivos (RUDY & WACHWSKI, 2010).

A eficácia dos inibidores migratórios em estruturas de concreto é avaliada por diversos métodos experimentais, os quais são agrupados em categorias específicas, como: proteção anticorrosiva, capacidade de migração, formação de filme protetor e compatibilidade com outros materiais.

2.2. Avaliação da eficácia em laboratório na proteção contra a corrosão

O método de ensaio mais amplamente utilizado para avaliar aditivos inibidores de corrosão em concretos é o definido pela norma americana ASTM C1582 / C1582M (2017). Esta especificação é composta por duas partes complementares.

A primeira parte consiste na verificação dos efeitos do inibidor de corrosão sobre as propriedades do concreto fresco e endurecido, incluindo: tempo de pega, teor de ar incorporado, resistências à compressão e à flexão, resistência à ação de ciclos de congelamento e degelo, e variação dimensional (retração ou expansão). A segunda parte da norma envolve ensaios de corrosão propriamente ditos, conduzidos de acordo com uma das duas metodologias padronizadas: ASTM G109 (2023) e ASTM G180 (2004) (2004).

O ensaio conforme a ASTM G109 (2023) é amplamente reconhecido por sua robustez e representatividade. Nesse método, blocos de concreto são moldados contendo uma disposição triangular de barras de aço, com uma barra posicionada na parte superior e duas na parte inferior (Figura 4). As amostras são submetidas a ciclos alternados de molhamento e secagem com solução salina (água com cloreto de sódio). Durante o ensaio, é monitorada e registrada a corrente de macrocélula entre a barra superior (ânodo)



e as barras inferiores (cátodos) a cada 4 semanas, sendo cada período de 4 semanas considerado um ciclo.

O ensaio é finalizado quando a carga elétrica total integrada da macrocélula atinge 150 Coulombs, valor que representa um limite crítico para análise da eficiência do inibidor de corrosão sob condições de exposição agressiva.

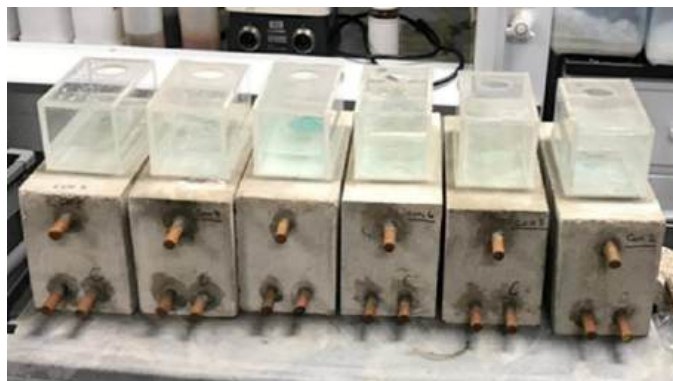


Figura 4. Corpos de prova moldados em laboratório de acordo com a ASTM G109 (2023).

A configuração experimental do ensaio ASTM G180 (2004) está representada na Figura 5. Este método fornece uma alternativa mais rápida para avaliação de aditivos inibidores de corrosão, utilizando uma solução cimentícia filtrada em vez de concreto moldado.

Enquanto o método ASTM G109 (2023) pode exigir meses ou até anos para fornecer resultados conclusivos sobre o desempenho em ambientes agressivos com cloretos, o ASTM G180 (2004) permite a obtenção de resultados em poucos dias, tornando-o uma ferramenta eficiente para triagem inicial de aditivos.

Nesse ensaio, avalia-se a resistência à polarização (R_p) de uma amostra de aço imersa na solução de teste. Aplica-se uma corrente elétrica controlada enquanto se varia o potencial elétrico, e a resposta da amostra é utilizada para calcular a resistência à polarização, parâmetro inversamente proporcional à taxa de corrosão.

De acordo com os critérios estabelecidos na norma ASTM C1582 (2017), um aditivo pode ser considerado efetivo como inibidor de corrosão, segundo o ensaio G180 (utilizando solução com 0,5 M de NaCl e oito amostras, quatro de controle e quatro com o aditivo), quando o valor médio de $1/R_p$ das amostras tratadas for igual ou inferior a $1/8$ do valor médio das amostras de controle.

Caso o desempenho dos corpos de prova com o inibidor de corrosão adicionado no ensaio G180 seja insatisfatório, são recomendados ensaios complementares, como o G109, para verificar se o aditivo ainda proporciona benefícios em relação à resistência à corrosão em longo prazo.

A Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS), representada esquematicamente na Figura 6, é uma técnica não destrutiva, rápida e precisa amplamente utilizada na avaliação de diversos materiais, incluindo revestimentos protetores, filmes anodizados e inibidores orgânicos de corrosão aplicados sobre superfícies metálicas (FURMAN & AUSTIN, 2016).

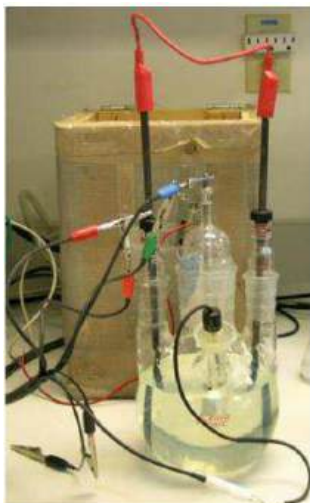


Figura 5. Configuração do ensaio de acordo com a ASTM G180 (2004) (2013).

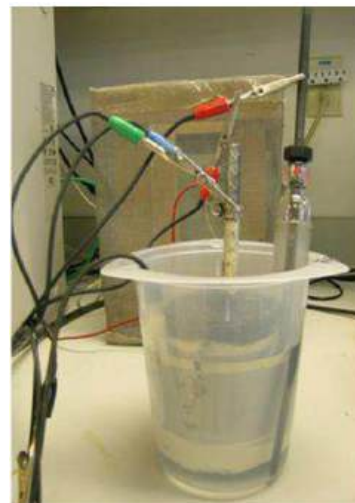


Figura 6. Configuração do ensaio de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS).

Durante os ensaios de EIS, aplica-se um sinal de corrente alternada de pequena amplitude ao sistema metálico sob investigação. A análise dos dados obtidos permite extrair informações detalhadas sobre a taxa de corrosão, os mecanismos eletroquímicos envolvidos, a cinética das reações e a detecção de corrosão localizada, mesmo em estágios iniciais.

Além dos ensaios padronizados anteriormente mencionados, como a ASTM G109 (2021), é comum a realização de ensaios modificados com o objetivo de acelerar os efeitos corrosivos e permitir a obtenção de resultados em menor prazo. Estes métodos são geralmente denominados ASTM G109 Modificado ou ensaio de viga fissurada.

No ensaio de viga fissurada, os corpos de prova são moldados conforme a configuração da norma ASTM G109 (2023), porém são propositalmente fissurados de forma controlada (por meio de cortes com serra e aplicação de tensões de flexão) antes do início dos ciclos de exposição à solução salina. Esse procedimento torna o ensaio mais agressivo, simulando a presença de fissuras reais no concreto.

Outras modificações usuais incluem:

- Aumento da concentração de NaCl na solução de exposição, de 3,5% para até 6%;
- Redução do tempo dos ciclos de molhamento e secagem, passando de 4 semanas para até 1 semana por ciclo;
- Substituição dos ciclos alternados por imersão permanente das vigas de concreto em solução salina, intensificando ainda mais o ambiente de ensaio.

Essas variações permitem avaliar o desempenho dos inibidores de corrosão em condições mais críticas, aproximando-se das situações encontradas em estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos, industriais ou contaminados por sais de degelo.



2.3. Avaliação da capacidade de migração dos inibidores de corrosão

A migração do inibidor no interior do concreto pode ser avaliada por meio de espectroscopia na região do ultravioleta (UV) (SHEN, 2014). Essa técnica permite detectar a presença do inibidor em diferentes profundidades do concreto, a partir da análise de amostras obtidas por extração de testemunhos (*core samples*) seccionados em camadas.

Os compostos apresentam absorção característica na faixa do UV, o que possibilita sua identificação. O método consiste em pulverizar as amostras de concreto e realizar uma extração dos inibidores presentes utilizando água deionizada. A solução extraída é, então, analisada por espectroscopia UV, comparando-se os valores de absorbância de amostras tratadas com o uso do inibidor com aqueles obtidos de amostras não tratadas, em comprimentos de onda específicos.

Inicialmente, os resultados obtidos são de natureza qualitativa, permitindo apenas identificar a presença ou ausência do inibidor nas diferentes profundidades analisadas. No entanto, caso seja estabelecida uma curva de calibração com concentrações conhecidas de inibidor, torna-se possível realizar uma quantificação mais precisa da concentração efetiva do inibidor em cada camada do concreto. Esse método é especialmente útil na validação da eficiência de penetração dos inibidores migratórios aplicados topicamente, e pode auxiliar na verificação do alcance real do produto até as regiões de armadura mais profundas.

Apesar da ampla comprovação experimental dos mecanismos de adsorção e da eficácia inicial dos inibidores de corrosão orgânicos, sua performance em horizontes de longo prazo ainda constitui uma questão em aberto. Estudos relatam bons resultados em ensaios acelerados e em estruturas monitoradas por alguns anos (SUN *et al.*, 2022), porém a degradação progressiva dos compostos, seja por lixiviação, consumo parcial ou alterações microestruturais do concreto, pode reduzir gradualmente a concentração efetiva junto à armadura, comprometendo a proteção em períodos superiores a uma ou duas décadas (MIKSIC, 2014).

Outro ponto relevante refere-se à interação dos inibidores com a carbonatação avançada. Em estágios iniciais, a presença do filme protetor pode retardar a despassivação, mas à medida que o pH da matriz se reduz em decorrência da carbonatação profunda, a estabilidade da película orgânica tende a ser afetada (WOMBACHER *et al.*, 2004; Bastidas *et al.*, 2005). Essa limitação ressalta a importância de estudos de longa duração que considerem cenários combinados de carbonatação e presença de cloretos, a fim de estabelecer parâmetros mais robustos e representativos das condições reais de serviço.

Assim, embora o tema já tenha sido amplamente estudado em diferentes contextos, a evolução das tecnologias e a diversidade de ambientes de exposição tornam essencial o aprofundamento contínuo das pesquisas. Essa lacuna representa não apenas um desafio, mas também uma oportunidade para consolidar critérios de desempenho e de vida útil mais precisos para o uso de inibidores de corrosão em estruturas de concreto armado.



3 Ensaios não-destrutivos para identificação do inibidor na armadura

A realização de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado é fundamental para a identificação precoce e confiável de processos de corrosão nas armaduras, sem comprometer a integridade da estrutura. Esses métodos permitem avaliar a condição eletroquímica do aço, mapear áreas críticas e monitorar a eficácia de intervenções, como a aplicação de inibidores de corrosão. Por meio de técnicas como medição de resistividade elétrica, potencial de corrosão e taxa de corrosão, é possível verificar se os agentes inibidores estão atuando de forma eficaz na mitigação da corrosão, auxiliando na tomada de decisões técnicas quanto à manutenção, reforço ou reabilitação da estrutura, com segurança, economia e precisão.

Os ensaios de resistividade elétrica e de potencial de corrosão são métodos não destrutivos essenciais para o diagnóstico da durabilidade e da integridade de estruturas de concreto armado, cada um baseado em princípios distintos. Ambos os ensaios permitem mapear áreas críticas da estrutura e devem ser utilizados de forma complementar, juntamente com outros métodos, para uma avaliação mais precisa das condições de exposição e da necessidade de intervenções preventivas ou corretivas.

O ensaio de resistividade elétrica, conforme a ABNT NBR 9204 (2012), mede a capacidade do concreto de resistir à passagem de corrente elétrica, sendo um indicativo indireto da probabilidade de corrosão das armaduras, especialmente útil em ambientes com umidade e presença de íons agressivos como os cloretos. O método mais comum é o de quatro pontas de Wenner (Figura 7) e a Tabela 1 relaciona a probabilidade de corrosão com a resistividade elétrica volumétrica do concreto.

Tabela 1. Probabilidade de corrosão em função da resistividade elétrica do concreto
Fonte: ABNT NBR 9204 (2014)

Resistividade elétrica do concreto ($\Omega \cdot m$)	Probabilidade de corrosão
> 200	Desprezível
100 a 200	Baixa
50 a 100	Alta
< 50	Muito alta

Já o ensaio de potencial de corrosão, regulamentado pela ASTM C186 (2022), avalia diretamente a probabilidade de corrosão ativa por meio da medição da diferença de potencial elétrico entre a armadura e um eletrodo de referência, como o de cobre/cobre-sulfato (Figura 8). A Tabela 2 relaciona a probabilidade de corrosão com o potencial de corrosão em função do potencial de corrosão obtido nos ensaios.

Tabela 2. Probabilidade de corrosão em função do potencial de corrosão.
Fonte: ASTM C186 (2004)

Potencial de corrosão relativo ao eletrodo de referência (mV)	Probabilidade de corrosão (%)
> - 200	≤ 5
- 200 a - 350	Incerto
< - 350	≥ 90



Figura 7. Ensaio de resistividade elétrica.
Fonte: Elaboração própria



Figura 8. Ensaio de potencial de corrosão.
Fonte: Elaboração própria

Há ainda o ensaio de taxa de corrosão que tem a capacidade de medir diretamente a intensidade da corrosão das armaduras em concreto armado, utilizando a técnica de polarização linear. Com eletrodos aplicados na superfície do concreto, sem expor o aço, o método determina a densidade de corrente de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), indicando a severidade do processo corrosivo (Tabela 3). É um ensaio não destrutivo, preciso e útil para diagnósticos e monitoramento em estruturas expostas a ambientes agressivos. As Figura 9 e Figura 10 mostram o ensaio sendo realizado para o mapeamento da taxa de corrosão em uma estrutura de concreto.

Tabela 3. Probabilidade de corrosão em função da taxa de corrosão.
Fonte: GIATEC SCIENTIFIC (2019)

Taxa de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Interpretação técnica	Probabilidade de corrosão
< 0,1	Corrosão insignificante	Muito baixa
0,1 a 0,5	Início da corrosão	Baixa
0,5 a 1,0	Corrosão moderada	Média
1,0 a 5,0	Corrosão ativa significativa	Alta
> 5,0	Corrosão severa com probabilidade de perda rápida de seção	Muito alta

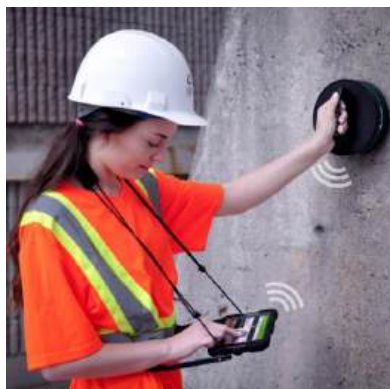


Figura 9. Ensaio para mapeamento da taxa de corrosão.
Fonte: GIATEC SCIENTIFIC (2019)



Figura 10. Estrutura saturada para o mapeamento da taxa de corrosão.
Fonte: GIATEC SCIENTIFIC (2019)



4 O uso dos inibidores de corrosão no Brasil

A aplicação de inibidores de corrosão em estruturas de concreto armado no Brasil teve início na década de 1990, acompanhando o avanço internacional das tecnologias voltadas à durabilidade das estruturas em ambientes agressivos. As primeiras utilizações documentadas ocorreram em obras expostas à atmosfera marinha, especialmente em regiões costeiras, com o objetivo de retardar os efeitos da corrosão induzida por cloretos nas armaduras.

Inicialmente, os produtos mais utilizados foram inibidores tópicos de superfície, aplicados durante intervenções de reparo em estruturas deterioradas, como pontes, passarelas e fachadas de edifícios. Ao longo dos anos 2000, consolidou-se o uso de inibidores migratórios, tanto em obras novas, que são adicionados diretamente nos concretos novos, quanto em obras de reabilitação estrutural. A seguir serão detalhados o uso dos inibidores de corrosão nestes dois tipos de obra.

4.1. Aplicação em obras novas

Em estruturas novas, os inibidores de corrosão são incorporados ao concreto na forma de aditivo, podendo ser adicionados à água de amassamento na central de concreto ou diretamente no caminhão betoneira, no canteiro de obras, antes da concretagem. A dosagem recomendada é fixa, ou seja, independente da concentração esperada de íons cloreto no sistema.

A dosagem é definida de modo a garantir uma concentração suficiente do inibidor para formar uma monocamada molecular sobre as armaduras embutidas, assegurando sua proteção eletroquímica. Diferentemente dos inibidores anódicos, como o nitrato de cálcio, os inibidores não apresentam um nível de concentração "perigoso", isto é, não há risco de corrosão localizada por pites mesmo quando a dosagem é inferior à ideal em relação à concentração de cloretos (NATHAN, 1973). As Figura 11 e Figura 12 mostram algumas aplicações dos inibidores em estruturas novas no Brasil.



Figura 11. Concretagem da estrutura do SESC Parque Dom Pedro II em São Paulo (SP) com inibidor de corrosão em seu traço.

Fonte: Elaboração própria



Figura 12. Concreto aparente com inibidor de corrosão em uma residência de alto padrão no Guarujá (SP).

Fonte: Elaboração própria



4.2. Aplicação em obras de reparo e reabilitação estrutural

Os inibidores de corrosão também podem ser utilizados na proteção de estruturas de concreto existentes, por meio de aplicações superficiais ou utilização em argamassas de reparo. Os produtos dessa categoria são, em geral, utilizados nas seguintes formas:

- Solução pura de inibidor, aplicada diretamente sobre a superfície do concreto: os inibidores migram até as armaduras embutidas através de infiltração capilar e difusão na fase de vapor;
- Hidrofugantes com inibidor de corrosão em sua composição, que atua reduzindo a penetração de agentes agressivos no concreto e, ao mesmo tempo, promove a formação de uma camada protetora sobre a superfície da armadura por meio da ação das moléculas do inibidor;
- Argamassa de reparo contendo inibidor de corrosão, na qual eles são incorporados à matriz cimentícia, permitindo sua migração até as armaduras e oferecendo proteção adicional durante e após a intervenção.

Nas obras de reparo e reabilitação estrutural, os inibidores desempenham um papel fundamental na mitigação da corrosão ativa já instalada nas armaduras de estruturas degradadas. Após a remoção do concreto contaminado e o preparo da superfície da armadura, a aplicação de argamassas de reparo formuladas com inibidor permite que eles migrem ao longo da interface aço-concreto, mesmo em regiões não diretamente acessíveis. Essa abordagem assegura a formação de uma camada protetora sobre o aço, estabilizando os potenciais eletroquímicos e retardando a propagação de células de corrosão.

As Figura 13 e Figura 14 mostram algumas aplicações dos inibidores migratórios de corrosão em obras de reparo e reabilitação estrutural no Brasil.



Figura 13. Aplicação do inibidor na reabilitação estrutural do Hotel Sofitel Ipanema no Rio de Janeiro (RJ)
Fonte: Elaboração própria



Figura 14. Inibidor de corrosão aplicado nas obras de reparo e recuperação estrutural do retrofit do Hotel Glória no Rio de Janeiro (RJ)
Fonte: CHIARI *et al.* (2025)



5 Comparação com outras soluções de proteção contra a corrosão

Os MCI distinguem-se de alternativas tradicionais, como o nitrito de cálcio, por não apresentarem limite crítico de concentração, evitando o risco de corrosão localizada por pites quando a dosagem é inferior a ideal (ACI 212.3R-16, 2016). O nitrito de cálcio, embora consolidado e eficaz na repassivação das armaduras, pode alterar significativamente o tempo de pega e a cinética de hidratação, exigindo ajustes de dosagem em obra (ACI 212.3R-10, 2010). Nesse sentido, os MCI oferecem maior flexibilidade de aplicação tanto em concretos novos quanto em intervenções de reparo, sem impacto relevante nas propriedades do concreto no estado fresco.

Do ponto de vista material, as barras de aço inoxidável apresentam desempenho notoriamente superior frente à corrosão, com vida útil estendida em ambientes marinhos, mas o custo elevado restringe sua aplicação a elementos estruturais de criticidade elevada (TULA, 2000). Embora não tenha sua aplicabilidade consolidada no Brasil, as barras galvanizadas e revestidas com epóxi também oferecem proteção inicial, embora sua durabilidade dependa da integridade do revestimento, tornando-as sensíveis a danos durante transporte e execução.

Em termos de soluções eletroquímicas, a proteção catódica, seja por corrente impressa ou por ânodos sacrificiais, constitui uma das alternativas mais eficazes para estruturas existentes em processo de deterioração, embora requeira monitoramento contínuo e maior especialização técnica (ARAÚJO *et al.*, 2013). Outras técnicas, como a extração eletroquímica de cloretos e a realcalinização, são aplicáveis em casos específicos de reabilitação, mas ainda pouco difundidas no Brasil devido à sua complexidade logística e ao custo elevado de implementação (MEYER, 2017).

Por fim, revestimentos superficiais, como hidrofugantes à base de silanos e siloxanos, destacam-se por reduzir a penetração de agentes agressivos e podem atuar de forma sinérgica com os inibidores migratórios, combinando barreira física e proteção eletroquímica (HUANG *et al.*, 2020). Apesar da necessidade de manutenção periódica desses revestimentos, a associação com MCI representa uma estratégia promissora para potencializar a durabilidade estrutural. Assim, em termos de custo-benefício e aplicabilidade, os inibidores orgânicos se consolidam como alternativa competitiva, sobretudo em ambientes agressivos, oferecendo equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade econômica no ciclo de vida da estrutura.

6 Conclusões

Os inibidores de corrosão vêm sendo utilizados na construção civil há mais de três décadas, com eficácia comprovada em diferentes tipos de estruturas. Estudos laboratoriais e de campo demonstram sua eficiência na mitigação da corrosão das armaduras, especialmente em ambientes agressivos. Além disso, tratamentos tópicos aplicados em estruturas existentes, como parte de processos de reparo e reabilitação, têm mostrado resultados consistentes, reduzindo taxas de corrosão mesmo em situações de contaminação por cloretos ou carbonatação, contribuindo para a extensão da vida útil das estruturas.

Apesar dos resultados positivos já comprovados, permanece a necessidade de aprofundar os estudos sobre a eficácia dos inibidores em horizontes de longo prazo, em especial



quanto à sua degradação progressiva e ao desempenho em condições de carbonatação avançada. Essa lacuna evidencia a importância de monitoramentos contínuos e de pesquisas que integrem diferentes mecanismos de deterioração, de modo a consolidar critérios mais robustos de desempenho e vida útil em estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos.

No Brasil, os inibidores de corrosão se consolidam como solução eficaz tanto para a prevenção quanto para o reparo e reabilitação de estruturas, destacando-se pela versatilidade e facilidade de aplicação. O país é reconhecido como referência internacional no tema, com pesquisas e publicações relevantes no meio técnico. Ainda assim, a evolução das tecnologias e a diversidade de ambientes de exposição reforçam a necessidade de ampliar continuamente o conhecimento, garantindo práticas mais sustentáveis e duráveis para a engenharia estrutural.

7 Referências

ACI 212.3R-16. **Report on Chemical Admixtures for Concrete**. American Concrete Institute, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM G180 (2004), **Standard Test Method for Corrosion Inhibiting Admixtures for Steel in Concrete by Polarization Resistance in Cementitious Slurries**, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), ASTM C1582/ C1582M, **Standard Specification for Admixtures to Inhibit Chloride-Induced Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete**, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**. ASTM C876, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM G109, **Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments**, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrico-volumétrica - Método de ensaio**. ABNT NBR 9204. Rio de Janeiro, 2012.

ARAÚJO, A., et al. **Proteção catódica de estruturas de concreto**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais (RIEM), 2013.

BASTIDAS, D. M.; BASTIDAS, J. M.; CABALLERO, A. **Inhibitors for steel reinforcement in concrete**. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, p. 347–352, 2005.

BAVARIAN B. AND REINER L., **Current progress in corrosion inhibition of reinforcing steel in concrete using migrating corrosion inhibitors**, Corrosion, Paper n. 06347, San Diego, National Association of Corrosion Engineers (NACE), 2006.



BJEGOVIĆ D., SIPOS L., UKRAINCZYK V., **Diffusion of the MCI 2020 and 2000 corrosion inhibitors into concrete**, *Proceedings of Steel in Concrete*, Sheffield, Academic Press, p. 865-877, 1994.

CHIARI, V.G., RAMOS, J. T., PASSOS, L. B., DE CARVALHO, I. P. G., BRITEZ, C. A., DA SILVA, M. R. **Ensaio não-destrutivo e o uso de inibidores migratórios de corrosão como solução corretiva nas obras de retrofit do Hotel Glória no Rio de Janeiro**. Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas (CBPE), 2025.

RIBEIRO, D. SALES, et al. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2. ed. 369 p. 2021.

FURMAN, A, AUSTIN, L. **Measurement of Electrochemical Impedance of Concrete Samples**. Cortec Test Method CC-022. St. Paul, Cortec Corporation, 2016.

HUANG, Q., et al. **Evaluation of different surface applied corrosion inhibitors systems on reinforced concrete structures**. Relatório técnico, 2020.

GIATEC SCIENTIFIC INC. **iCOR User Manual**. 2019. Disponível em <https://www.giatecscientific.com/products/concrete-ndt-devices/icor-rebar-corrosion-rate/>. Acesso em 21 de junho de 2025.

MEYER, J., **Organic Corrosion Inhibitors – New build and existing structures performance**. Brian Cherry International Concrete Symposium. Paper n. 12, 19 p. 2017.

MIKSIC, B. **Migrating Corrosion Inhibitors: Mechanism of Action and Performance in Concrete**. Cortec Technical Papers, 2014.

NATHAN C.C., **Corrosion Inhibitors**. National Association of Corrosion Engineers (NACE). Houston, 1973. p. 259.

RUDY A., WACHOWSKI L., ASTM E96 (2005) - **Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials**. TCG Project n.09146, Kalamazoo, Tourney Consulting Group, 2010.

SHEN, M. **Detecting MCI in Hardened Concrete**. Cortec Test Method CC-048. St. Paul, MN: Cortec Corporation; 2014.

SUESS T. AND STEHLY R., **Report of Corrosion Inhibitor Testing** AET Job n. 05-00021, St. Paul, American Engineering and Testing, 2002.

SUN, C.; WANG, W.; ZHAO, Y.; et al. **Anti-Corrosion Performance of Migratory Corrosion Inhibitors on Concrete under Chloride Erosion**. *Materials*, v. 15, n. 15, p. 1–13, 2022.

TULA, L. **Corrosão de Armaduras de Aço Inoxidável**. Tese de Doutorado, EPUSP, 2000.

WOMBACHER, F.; KÄGI, R.; WANNER, A. **Aminoalcohol based mixed corrosion inhibitors**. *Cement and Concrete Composites*, v. 26, p. 209–216, 2004.